ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1977

Seria: GÓRNICTWO z. 78 Nr kol. 510

Jerzy ZAWORA, Henryk BUDZYŃSKI

BADANIA WPŁYWU POZIOMYCH ODKSZTAŁCEŃ PODŁOŻA WYWOŁANYCH PODZIEMNĄ EKSPLOATACJĄ GÓRNICZĄ NA FUNDAMENTY BUDOWLI

Streszczenie. W pracy scharakteryzowano przeprowadzone badania wpływu, występujących wskutek podziemnej eksploatacji górniczej, poziomych odkształceń podłoża, na ławy fundamentowe budowli.

Wykonano badania modelowe oraz badania terenowe na specjalnie w tym celu wzniesionych obiektach eksperymentalnych.

Celem tych badań było określenie wielkości sił w ławach wiotkich usytuowanych równolegle i prostopadle do kierunku odkształceń gruntu sypkiego, a powodujących jego rozluźnienie. Przedstawiono wyniki badań oraz ich interpretację, na podstawie której sformułowano wzory pozwalające oceniać poziome siły w fundamentach budowli posadowionych na terenach górniczych. Siły te są znacznie mniejsze od tych na jakie projektuje się obecnie zabezpieczenia budowli przed szkodami górniczymi.

1. Wstęp

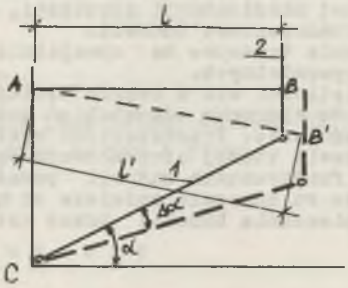
Przy projektowaniu fundamentów podlegających działaniu rozpełzającego podłoża górniczego, dla określania naprężeń stycznych stosowane są powszechnie metody, które wyróżniają dwie fazy pracy podłoża: fazę sprężystą i fazę plastyczną. Dla bardzo małych wielkości rozpełzania odkształcenia gruntu pod całym fundamentem są sprężyste, a naprężenia styczne mają rozkład trójkątny. W miarę wzrostu rozpełzania siły styczne wzrastają do momentu aż począwszy od skrajów budowli powstanie w podłożu stan graniczny. Granicą wzrostu naprężeń jest standardowa wytrzymałość gruntu na ścinanie, określona przy założeniu, że ścięcie gruntu nastąpi bezpośrednio pod podstawą fundamentu. Wykres naprężeń w tej fazie, w miarę wzrostu odkształceń, dąży do rozkładu prostokątnego. Prowadzone od szeregu lat badania [4, 5, 7, 8, 9] wskazywały, że maksymalne siły styczne są znacznie mniejsze od tych na jakie projektuje się zabezpieczenia budowli. Wyniki tych badań nie zostały zweryfikowane w warunkach naturalnych i dlatego nie znalazły praktycznego zastosowania przy projektowaniu zabezpieczeń budowli przed szkodami górniczymi.

Nowe światło na zagadnienie rozpełzania podłoża fundamentów budowli rzuciły prace [1, 3, 6, 10] wskazujące na powstanie stanów granicznych w ośrodku gruntowym wskutek jego rozpełzania.

W ramach prac Głównego Instytutu Górnictwa prowadzono badania laboratoryjne i terenowe wpływu rozpełzania na siły w fundamentach budowli. Badania te dotyczyły wiotkich ław [1, 11] i wraz z wcześniej prowadzonymi badaniami pozwoliły zweryfikować metody oceny sił spowodowanych tarciem odkształcającego się podłoża o podeszwy fundamentów.

2. Urządzenia badawcze

Badania modelowe wykonywano na urządzeniach, w których podobnie jak w naturze grunt ulegał odkształceniom wskutek działania sił grawitacji.



Rys. 1. Zasada modelowania poziomych odkształceń gruntu

Rys. 1 obrazuje zasadę modelowania poziomych odkształceń w urządzeniach. Zastosowano tu ruchomy element dna 1 i ruchomą ściankę pojemnika gruntu 2, co umożliwiło przemieszczanie cząstek gruntu. Wskutek obrotu dna wokół punktu C występujące przemieszczenia są tym większe im cząstki bardziej oddalone są od nieruchomej ścianki AC.

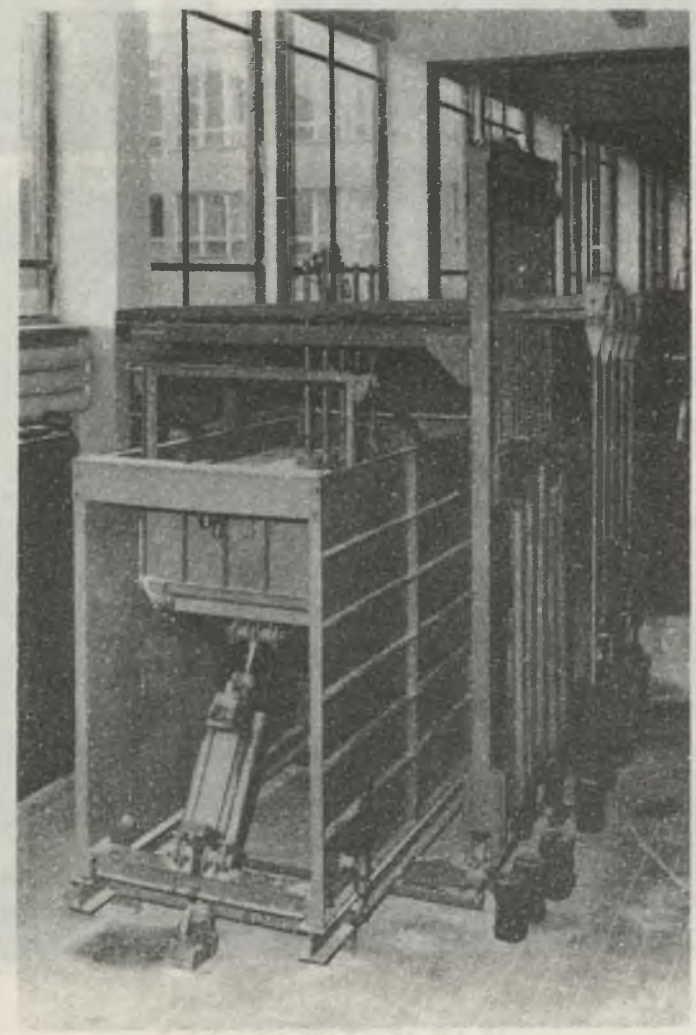
Jako poziome odkształcenia uważano odkształcenie w kierunku równoległym do powierzchni naziomu. Odkształcenia te określone na podstawie zależności geometrycznych wynoszą:

$$\varepsilon = \sqrt{1+2\frac{\Delta\alpha}{180}\,\pi\,\mathrm{tg}\,\alpha + \left(\frac{\Delta\alpha}{180}\right)^2\pi} - 1$$

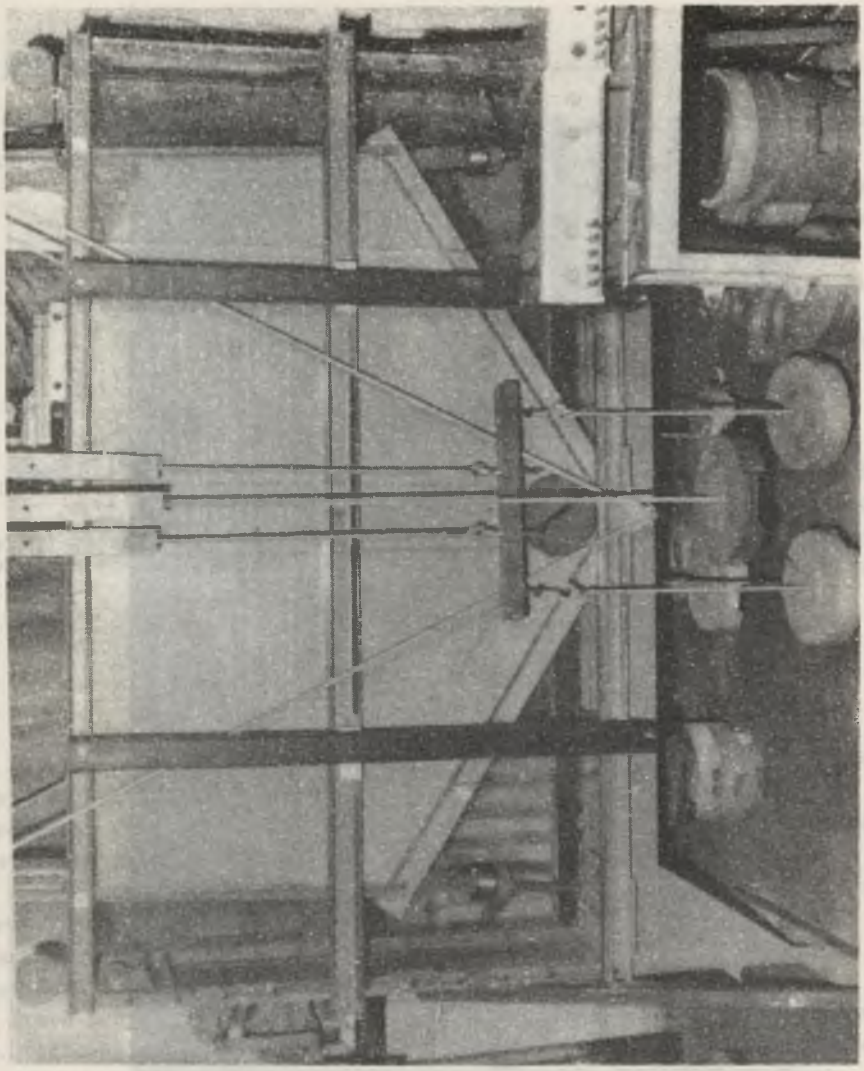
Fotografię urządzenia do badania ław usytuowanych dłuższym bokiem w kierunku występowania odkształceń przedstawiono na rys. 2. Na rys. 3 zamieszczono fotografię urządzenia do badania ław usytuowanych poprzecznie w stosunku do kierunku odkształceń podłoża.

W urządzeniu tym zmodyfikowano sposób modelowania odkształceń przez wprowadzenie dwóch ruchomych elementów dna i dwóch ruchomych ścianek pojemnika gruntu. Uzyskano w ten sposób bardziej równomierny rozkład odkształceń próbki gruntu.

Przed przystąpieniem do badań modelowych urządzenia zostały wycechowane. Cechowanie urządzeń badawczych polegało na doświadczalnym ustaleniu rozkładu odkształceń na powierzchni naziomu i wewnątrz próbki gruntu. W przypadku urządzenia do badania ław podłużnych na powierzchni naziomu zastabilizowano repery, których odległości od nieruchomej ścianki urządzenia mierzono przed i po wywołaniu odkształceń. Odczytów dokonywano stosując podziałkę z noniuszem.



Rys. 2. Urządzenie do badania ław podłużnych



Rys. 3. Urządzenie do badania ław poprzecznych

W urządzeniach do badania ław poprzecznych, przy przeźroczystej jego ściance, umieszczono w gruncie repery. Repery usytuowano w trzech rzędach, których położenie przed i po wywołaniu odkształceń zostało sfotografiwane. Wzajemne odległości pomiędzy reperami odczytywano następnie za pomocą stereokomparatora i określono wielkość oraz rozkład odkształceń w próbce gruntu. Określone na podstawie cechowania zależności pomiędzy obniżeniem dna i wielkością odkształceń okazało się, że teoretycznie równomierny rozkład odkształceń zaburzony jest przy pionowych ściankach pojemników gruntu.

Badania modelowe poprzedzono kalibrowaniem stanowisk, polegającym na takim doborze wielkości badanych modeli ław fundamentowych by wskutek ograniczonej objętości próbki gruntu nie zostały zaburzone wyniki pomiarów.

W badaniach ław podłużnych modelowano połowę długości ławy fundamentowej. Osią symetrii była nieruchoma pionowa ścianka pojemnika, do której mocowano modele fundamentów. Stosowano modele ław o szerokości 20 cm i długościach 60, 80 i 100 cm, składające się z segmentów o długości 10 cm. Segmenty modeli ław połączono z sobą w sposób przegubowy. W co drugim połączeniu zastosowano siłomierze tensometryczne. Każdy z segmentów obciążano niezależnym systemem dźwigni.

Model ławy poprzecznej posiadał szerokość 20 cm i długość 30 cm odpowiadającą szerokości pojemnika gruntu. Składał się on z trzech nie połączonych z sobą odcinków. Podziału na odcinki dokonano w celu eliminowania wpływu tarcia gruntu o ścianki czołowe urządzenia. Obciążenie pionowe modelu ławy realizowano za pomocą obciążników zawieszonych na wieszakach opartych na górnych powierzchniach modelu fundamentu. Odcinki modelu ławy mocowano do jarzma siłomierzami tensometrycznymi w sposób przegubowy.

3. Badania modelowe

Badania modelowe prowadzono na modelach piaskowych. Program tych badań opracowany został w oparciu o analizę wymiarową stanowiącą również podstawę interpretacji wyników doświadczeń. Czynniki wpływające na przebieg zjawisk w podłożu, a stanowiące o wielkości sił stycznych w podstawie fundamentu ustalono biorąc pod uwagę doświadczenia z przesuwaniem fundamentów po podłożu oraz wstępne badania modelowe wpływu odkształceń na siły w fundamentach budowli [10].

W przypadku ław podłużnych założono, że wielkość siły podłużnej powstałej wskutek rozpełzania sypkiego podłoża opisuje następująca funkcja zmiennych wymiarowych

$$z = F(\sigma, b, \gamma, l, \varphi, u)$$

gdzie:

τ - siła podłużna w fundamencie,
γ - ciężar objętościowy gruntu,
φ - kąt tarcia wewnętrznego,
σ - nacisk pionowy fundamentu,
b - szerokość fundamentu,
l - długość fundamentu,
u - przemieszczenie poziome gruntu względem fundamentu.

Przyjmując jako zmienne niezależne γ i l z analizy wymiarowej otrzymano, że modelując fundament w skali α_L oraz stosując taki sam grunt jak w naturze, pionowe naciski oraz przemieszczenia poziome gruntu należy modelować również w skali α_L. Wyniki badań uzyska się wtedy w skali $\lambda = \alpha_L^3$.

Badania ław podłużnych przeprowadzono używając modeli ław o trzech różnych długościach z zastosowaniem nacisków σ = 0,108; 0,249 i 0,389 kG/cm^3. Polegały one na stopniowym modelowaniu odkształceń gruntu oraz pomiarze sił powstałych w elementach pomiarowych. Wykonano ponadto doświadczenia, których celem było określenie kształtu powstałych w podłożu powierzchni poślizgów. Doświadczenia te polegały na wprowadzeniu w podłoże cienkiej pionowej warstwy gipsu, która po przeprowadzonym badaniu została zwilżona, a następnie po stężeniu gipsu odsłonięta ukazując przemieszczenia brył gruntu po powierzchniach poślizgu.

Rozpatrując proces deformacji podłoża pod budowlą przy analizie czynników wpływających na naprężenia styczne pod ławami poprzecznymi, stwierdzono, że elementami zmieniającymi istniejący pierwotnie w podłożu stan naprężeń są przemieszczenia gruntu względem fundamentów i odkształcenia brył gruntu współpracujących z poszczególnymi ławami.

Biorąc to pod uwagę naprężenia styczne opisano w formie następującej zależności:

$$\tau = F(\sigma, b, \gamma, \varphi, \varepsilon, u)$$

gdzie:

σ, b, γ, φ, u - oznaczają zmienne wymiarowe jak poprzednio,
ε - poziome odkształcenie gruntu pod ławą, jakie wystąpiłoby, gdyby nie spoczywał na nim fundament.

Również w tym przypadku za wielkości zmienne niezależne przyjęto γ i b ustalając kryteria podobieństwa i warunki jakim odpowiadać powinny skale modelowania. Z analizy wymiarowej wynikało, że modelując fundament w skali α_L oraz prowadząc badania na gruncie takim samym jak w naturze, przemieszczenia gruntu względem fundamentu należy modelować w skali α_L, a odkształcenia w skali naturalnej. Modelując przy tym naciski w skali α_L wyniki uzyska się także w skali $\lambda = \alpha_L$.

Badania ław poprzecznych polegały na stopniowym wywoływaniu poziomych odkształceń gruntu i jednoczesnym przemieszczaniu za pomocą jarzma trzech odcinków modelu ławy względem konstrukcji urządzenia. W trakcie badań mierzono poziomą siłę jaką przyłożono do środkowego odcinka modelu dla przesunięcia go po odkształcającym się podłożu. Doświadczenia prowadzono stosując naciski jednostkowe σ = 0,4, 0,8, i 1,2 kG/cm^2, stosowano przy tym cztery różne intensywności wzrostu deformacji podłoża charakteryzujące się stosunkiem $\frac{u}{\varepsilon b}$ = 3,4; 10,2; 20,4 i ∞.

W trakcie zasypywania pojemnika gruntu piaskiem przy czołowej przeźroczystej ściance urządzenia usypywano cienkie warstwy talku. Warstwy talku w czasie badań ulegały przemieszczeniom wskazując przebieg powierzchni poślizgu w podłożu fundamentów.

4. Badania terenowe

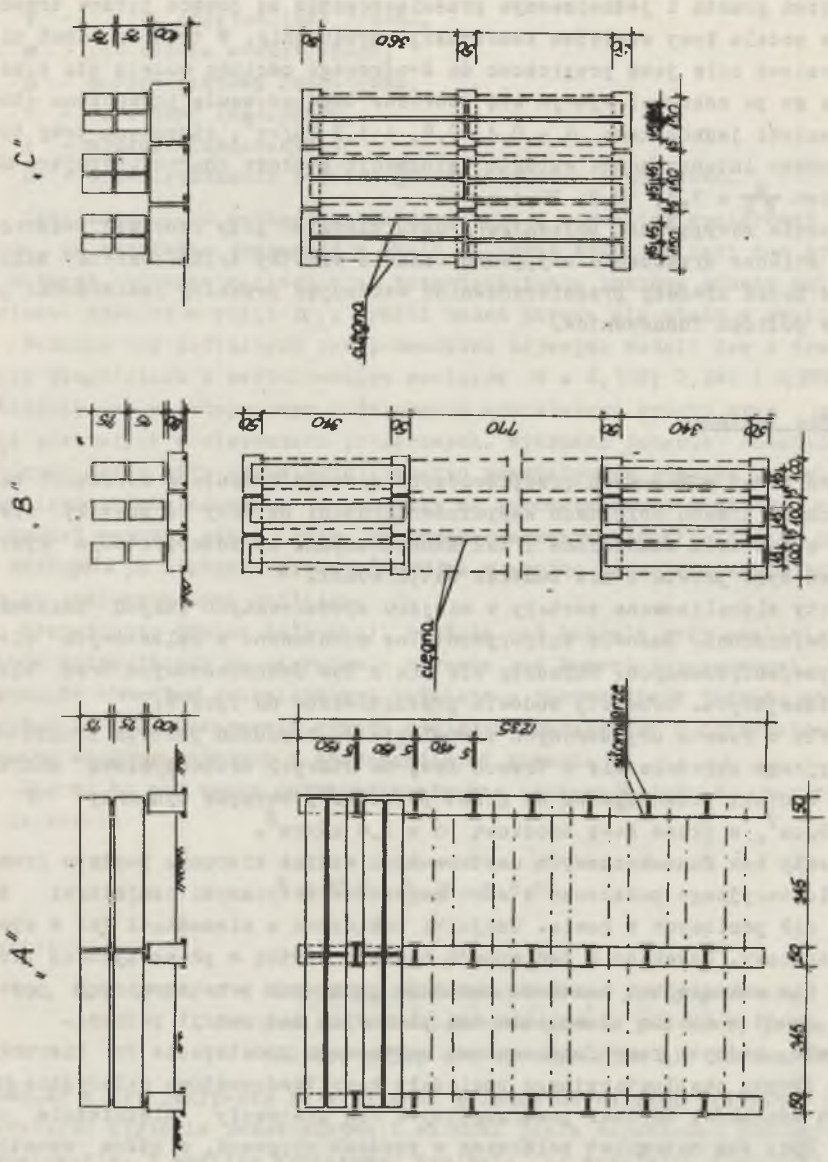
Oprócz badań modelowych przeprowadzono również badania w warunkach naturalnych na trzech obiektach eksperymentalnych. Obiekty te zostały specjalnie w tym celu wzniesione i tak skonstruowane by interpretacja wyników badań była prosta i nie budziła wątpliwości.

Obiekty zlokalizowane zostały w miejscu spodziewanych dużych deformacji i powierzchni. Budowle eksperymentalne zmontowano z żelbetowych elementów prefabrykowanych. Składały się one z ław fundamentowych oraz bloków obciążających. Schematy budowli przedstawiono na rys. 4.

Budowla o ławach usytuowanych równolegle do kierunku postępu frontu eksploatacyjnego składała się z trzech ław, na których ułożono bloki obciążające. Naciski przekazywane na grunt przez ławy skrajne wynosiły σ = 1,0 kG/cm^2, a przez ławę środkową σ = 2,0 kG/cm^2.

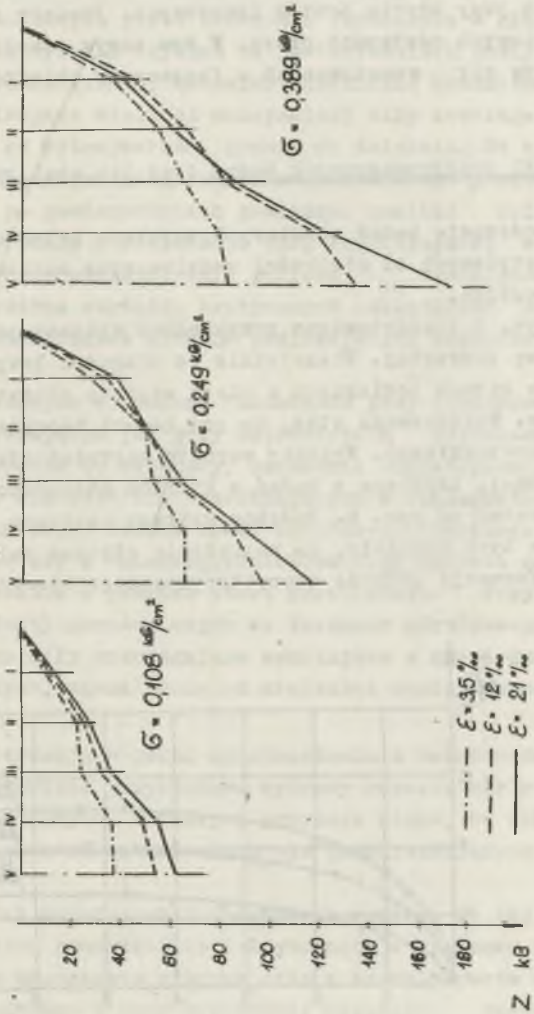
Elementy ław fundamentowych usytuowanych wzdłuż kierunku postępu frontu eksploatacyjnego połączono z sobą magneto-elastycznymi czujnikami do pomiaru sił poziomych w ławie. Czujniki połączono z elementami ław w sposób przegubowy. Uzyskano w ten sposób budowlę wiotką w płaszczyznach pionowych, nie zmieniającą rozkładu nacisków pionowych przekazywanych przez ławy na grunt w czasie ujawnienia się pionowych deformacji podłoża.

Budowle, których ławy fundamentowe usytuowano prostopadle do kierunku postępu frontu eksploatacyjnego posiadały ławy fundamentowe składające się z trzech odcinków. Odcinki poszczególnych ław pracowały niezależnie od siebie. Były one natomiast połączone w rzędach ciągnami, w które wmontowane zostały siłomierze tensometryczne. Wykonano dwie budowle; jedną o trzech ławach i drugą o czterech ławach poprzecznych. Fundamenty budowli składającej się z trzech ław przekazywały naciski $\sigma \cong$ 1,8 i 1,0 kG/cm^2. Naciski przekazywane przez fundamenty budowli o czterech ławach wynosiły $\sigma \cong$ 0,7 kG/cm^2.



Rys. 4. Schematy budowli eksperymentalnych

"A" - budowla o ławach podłużnych, "B" "C" - budowle o ławach poprzecznych



Rys. 5. Wzrost sił w modelu ławy podłużnej o długości 1,0 m

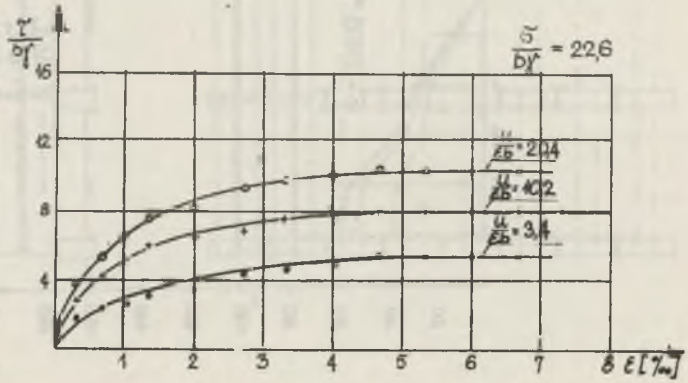
Bezpośrednie podłoże obiektów stanowiła warstwa piasku czwartorzędowego o grubości 10 m. Pod poligonem doświadczalnym wybierano pokład o grubości 2,7 m zalegający na głębokości 110 m. Eksploatację prowadzono systemem ścianowym z zawałem stropu.

Wokół budowli założono sieć reperów ziemnych do prowadzenia pomiarów deformacji powierzchni metodami geodezyjnymi. Repery te usytuowano w odstępach co ok. 3,0 m. W czasie ujawniania się wpływów eksploatacji prowadzono niwelację precyzyjną oraz dokonywano pomiarów odległości reperów ziemnych przy użyciu drutów inwarowych. Pomiary geodezyjne prowadzono w kilkudniowych odstępach czasu. W tym samym czasie rejestrowano wskazania mierników sił wmontowanych w fundamenty obiektów eksperymentalnych.

5. Wyniki przeprowadzonych badań oraz ich analiza

Na podstawie badań modelowych uzyskano zależności poziomych sił i naprężeń stycznych od wielkości modelowanych nacisków oraz elementów deformacji podłoża.

Na rys. 5 przedstawiono przykładowo wykresy obrazujące wzrost sił w modelu ławy podłużnej. Niezależnie od długości ławy i jej obciążenia wykresy sił w łatach podłużnych w miarę wzrostu odkształceń przybierały formę trójkąta. Wnioskowano stąd, że pod ławami naprężenia styczne dążą do rozkładu prostokątnego. Wykresy wzrostu naprężeń stycznych pod modelem ławy poprzecznej, uzyskane z badań w których stosowano nacisk $\sigma = 0,8$ kG/cm^2, zamieszczono na rys. 6. Podobne wykresy uzyskano z pozostałych badań. Z wykresów tych wynikało, że naprężenia styczne zależą od modelowanego wskaźnika deformacji podłoża charakteryzowanego stosunkiem $\frac{u}{\delta b}$.



Rys. 6. Wzrost naprężeń stycznych w podstawie modelu ławy poprzecznej przy $\sigma = 0,8$ kG/cm^2

W wyniku badań przeprowadzonych na modelach fundamentów stwierdzono że siły rozciągające w ławach rosną tylko do pewnej wielkości rozpełzania, przy której osiągają wartości maksymalne. Dalszy wzrost rozpełzania nie powoduje już wzrostu tych sił.

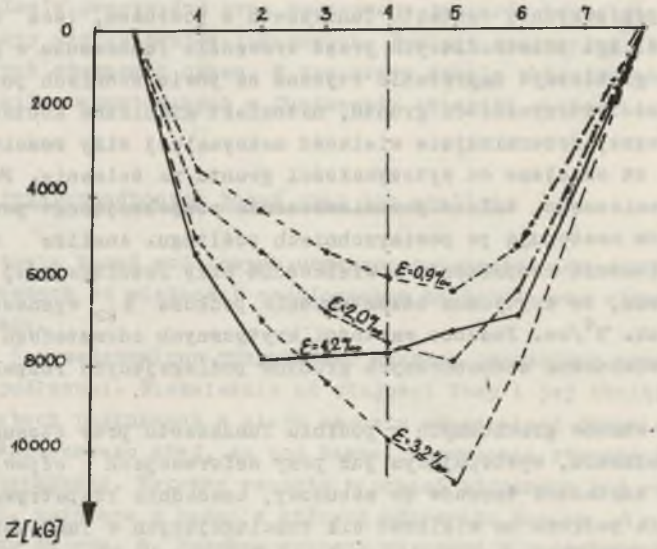
Istnieją więc krytyczne wielkości rozpełzania, przy których w podłożu gruntowym występuje stan równowagi granicznej charakteryzujący się tym, że grunt nie jest już zdolny do przenoszenia większych naprężeń stycznych. Doświadczalnie stwierdzono przy tym, że ścięcie gruntu pod fundamentem nie następuje w płaszczyźnie kontaktu fundamentu z podłożem, lecz wzdłuż powierzchni poślizgu przechodzących przez krawędzie fundamentu w głąb podłoża. W stanie granicznym naprężenia styczne na powierzchniach poślizgu osiągają wartośc wytrzymałości gruntu, natomiast graniczne kontaktowe naprężenia styczne, determinujące wielkość maksymalnej siły rozciągającej w fundamencie, są mniejsze od wytrzymałości gruntu na ścinanie. Po wystąpieniu stanu granicznego, dalsze przemieszczenia rozpełzającego podłoża względem fundamentu następują po powierzchniach poślizgu. Analiza zależności pomiędzy wielkością rozpełzania a wielkością siły rozciągającej w fundamencie wykazała, że krytyczne odkształcenia podłoża ε_{kr} wyznaczone z badań wynoszą ok. $3^{o}/oo$. Podobne wartości krytycznych odkształceń uzyskano w badaniach własności mechanicznych gruntów podlegających rozpełzaniu [3, 6].

Powstanie stanów granicznych w podłożu fundamentu przy stosunkowo niewielkim rozpełzaniu, występującym już przy deformacjach odpowiadających II kategorii zdatności terenów do zabudowy, uzasadnia rozpatrywanie wpływu rozpełzania podłoża na wielkość sił rozciągających w fundamentach przy przyjęciu dla ośrodka gruntowego modelu ciała sztywno-plastycznego. Przyjęcie takiego modelu wiąże się z nieuwzględnieniem fazy wzrostu naprężeń stycznych do momentu powstania w podłożu stanu granicznego. Przy takim przyjęciu, fundamenty budowli posadowionych na terenach górniczo-zagrożonych należy projektować na siły rozciągające wynikające z granicznych kontaktowych naprężeń stycznych, niezależnie od wielkości spodziewanego rozpełzania.

Badania terenowe potwierdzają w pełni spostrzeżenia z badań modelowych. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przykładowo wykresy wzrostu sił w fundamentach budowli eksperymentalnych, z których wyraźnie widać, że siły stabilizują się przy niewielkich odkształceniach nie przekraczających $\varepsilon_{kr} = 3‰$.

Z przeprowadzonych badań modelowych i terenowych wynika, że pod wiotką ławą fundamentową, obciążoną równomiernie i usytuowaną w kierunku rozpełzania podłoża, kontaktowe naprężenia styczne dążą w miarę wzrostu rozpełzania do rozkładu prostokątnego i przy krytycznej wielkości rozpełzania ε_{kr} osiągają praktycznie pod całym fundamentem jednakową wartość graniczną. Graniczna wartość kontaktowych naprężeń stycznych, w przypadku posadowienia fundamentów na gruntach sypkich, jest niezależna od prędkości

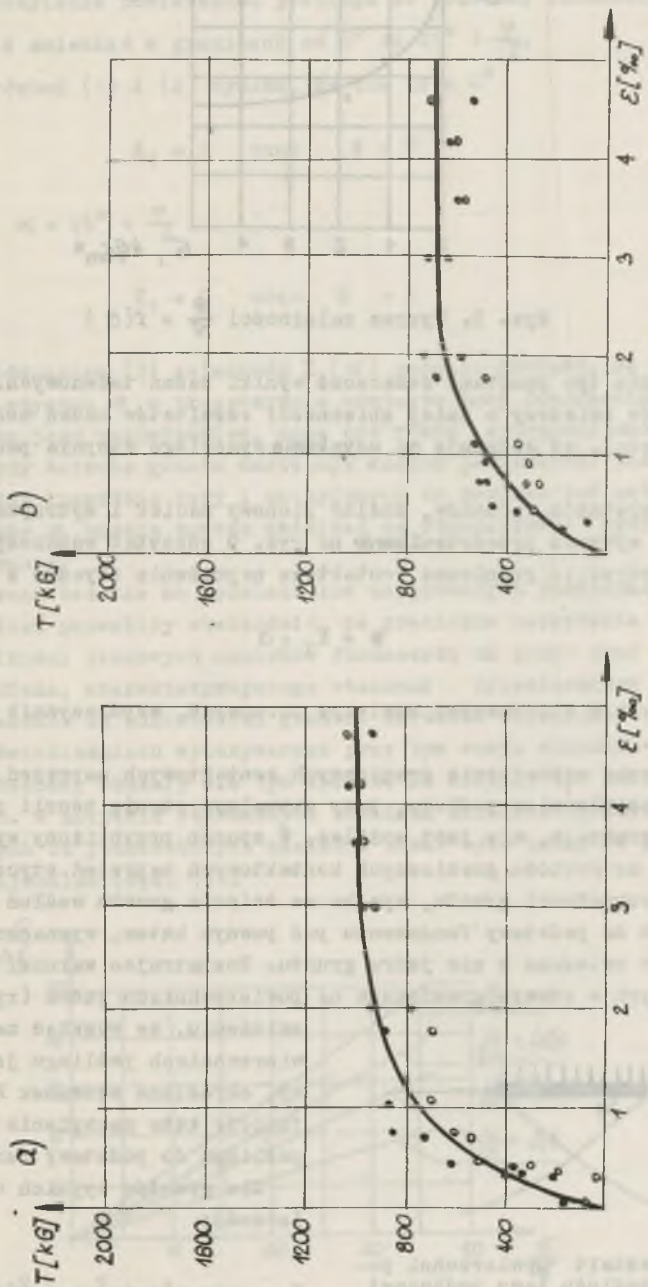
rozpełzania. Stwierdzono, że stosunek granicznych kontaktowych naprężeń stycznych θ do standardowej wytrzymałości gruntu na ścinanie, określonej wzorem Coulomba $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi$, jest wielkością zależną od pionowego nacisku fundamentu na grunt. Zależność $\frac{\theta}{\tau} = K_1$ przedstawiono na rys. 9.



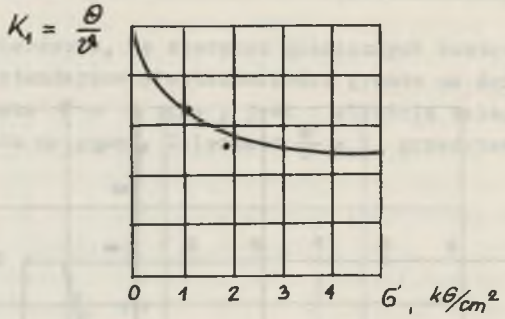
Rys. 7. Wykresy sił podłużnych w ławie skrajnej budowli "A"

W przedziale naprężeń pionowych σ od 1 do 4 kG/cm^2, obejmującym stosowane najczęściej w praktyce inżynierskiej obciążenia gruntów, zależność K_1 została określona doświadczalnie. Eksploatację tej zależności dla przedziału obciążeń od 0 do 1 kG/cm^2 uzasadniono następująco.

Zasadniczą przyczyną otrzymywania naprężenia θ mniejszego od wytrzymałości gruntu τ jest powstawanie w podłożu stanów równowagi granicznej, w czym istotny udział ma obciążenie fundamentu. Przy $\sigma \to 0$ zanika wpływ obciążenia budowlą na powstawanie w podłożu stanu granicznego, nie ma powodu tworzenia się pod ławami powierzchni poślizgu ukośnych do podstawy fundamentu i można przypuszczać, że ścięcie gruntu nastąpi wówczas w płaszczyźnie kontaktu ławy z podłożem. W analogii do doświadczeń przeprowadzonych dla przypadku przesuwania płyty po gruncie [2] będzie wówczas $\frac{\theta}{\tau} \cong 1$. Nie ma natomiast żadnych przesłanek do ekstrapolacji wykresu K_1 dla obciążeń σ znacznie przekraczających 4 kG/cm^2. Dla celów praktycznych można jednak w zakresie obciążeń σ do 5 kG/cm^2 ekstrapolować otrzymane doświadczalnie wyniki w sposób oznaczony na rys. 9.



Rys. 8. Wzrost sił uzyskujących środkowe odcinki ław budowli "B"
a) - ław zewnętrznych, b) - ław wewnętrznych



Rys. 9. Wykres zależności $\frac{\theta}{\vartheta} = f(\sigma)$

Na rysunku tym punktami oznaczono wyniki badań terenowych. Usytuowanie tych punktów świadczy o dużej zbieżności rezultatów badań modelowych do rzeczywistości, co wskazuje na uzyskanie wysokiego stopnia podobieństwa modelowego.

Dla konkretnych warunków, znając pionowy nacisk i wytrzymałość gruntu ϑ, można z wykresu przedstawionego na rys. 9 odczytać współczynnik K_1, a następnie określić graniczne kontaktowe naprężenia styczne z zależności

$$\theta = K_1 \cdot \sigma \tag{1}$$

Dla praktycznie stosowanych nacisków pionowych, współczynnik K_1 wynosi od 0,5 do 0,6.

Teoretyczne wyznaczenie granicznych kontaktowych naprężeń stycznych wywołanych rozpełzaniem podłoża, przy aktualnym stanie teorii równowagi granicznej w gruntach, nie jest możliwe. W sposób przybliżony wykazano analitycznie, że wartość granicznych kontaktowych naprężeń stycznych, mniejsza od wytrzymałości gruntu, wynika ze ścięcia gruntu wzdłuż powierzchni nachylonych do podstawy fundamentu pod pewnym kątem, wyznaczającym pod fundamentem związane z nim jądro gruntu. Rozpatrując warunki równowagi sił występujących w stanie granicznym na powierzchniach jądra (rys. 10) przy założeniu, że rozkład naprężeń na powierzchniach poślizgu jest równomierny, określono stosunek $K_1 = \frac{\theta}{\vartheta}$ jako funkcję kąta nachylenia powierzchni poślizgu do podstawy fundamentu.

Rys. 10. Kształt powierzchni poślizgu w podłożu ławy podłużnej

Dla gruntów sypkich otrzymano zależność:

$$K_1 = \cos\alpha \left[1 - tg^2\alpha \, ctg^2(45 + \frac{\varphi}{2})\right] \tag{2}$$

gdzie:

α - kąt nachylenia powierzchni poślizgu do podstawy fundamentu.

Kąt α może się zmieniać w granicach od 0° do $45^{\circ} + \frac{\varphi}{2}$.

Z analizy równań (1) i (2) wynika, że dla $\alpha = 0^{\circ}$

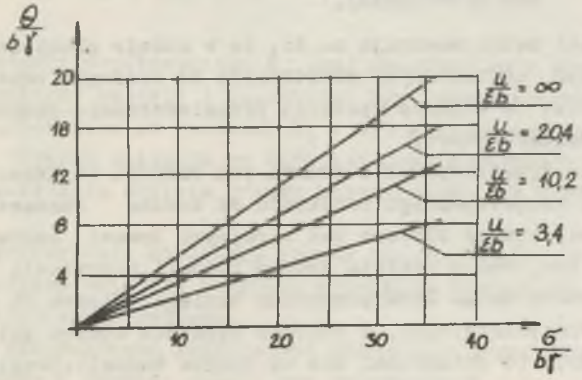
$$K_1 = 1 \quad \text{oraz} \quad \theta = \tau$$

natomiast dla $\alpha = 45^{\circ} + \frac{\varphi}{2}$

$$K_1 = 0 \quad \text{oraz} \quad \theta = 0$$

Określona równaniem (2) zależność $K_1(\alpha)$ pozwala dowieść, że graniczne naprężenia styczne θ w płaszczyźnie kontaktu ławy fundamentowej z podłożem, wywołane jego rozpełzaniem, może być równe wytrzymałości gruntu tylko wtedy, gdy ścięcie gruntu następuje wzdłuż powierzchni poślizgu przechodzących przez krawędzie ławy i nachylonych do poziomu pod kątem α, naprężenie styczne θ będzie zawsze mniejsze od standardowej wytrzymałości gruntu na ścinanie.

Przeprowadzone badania na modelach ław usytuowanych prostopadle do kierunku odkształceń pozwoliły stwierdzić, że graniczne naprężenia styczne zależą od wielkości pionowych nacisków fundamentu na grunt oraz wskaźnika deformacji podłoża, charakteryzującego stosunek przemieszczeń podłoża względem fundamentu od odkształceń gruntu. Wartości naprężeń stycznych, uzyskane w doświadczeniach wykonywanych przy tym samym stosunku przemieszczeń od odkształceń, okazały się tym większe im większy był nacisk fundamentu na grunt. W zakresie stosowanych obciążeń zależność granicznych naprężeń stycznych od jednostkowych nacisków uznać było można w przybliżeniu za proporcjonalną (rys. 11).



Rys. 11. Wykresy zależności naprężeń stycznych od nacisków, przy różnych stosunkach $\frac{u}{\varepsilon b}$.

Siły styczne, powstające w podstawie ław fundamentowych budowli, są efektem mobilizacji sił wewnętrznych ośrodka gruntowego, wskutek przemieszczenia się mas gruntu zalegających pod budowlą. Siły te wzrastają wraz ze wzrostem przemieszczeń i zależą od ich wielkości. Wzrost sił stycznych następuje do momentu osiągnięcia wytrzymałości podłoża, co wiąże się z wystąpieniem w podłożu odpowiedniego stanu naprężeń. W rozpatrywanym przypadku czynnikami wpływającymi na zmianę istniejącego stanu naprężeń są poziome odkształcenia podłoża oraz siły styczne spowodowane przemieszczeniem się gruntu względem fundamentu. Stan graniczny powstać więc może wskutek samych tylko odkształceń gruntu, w wyniku tylko przemieszczeń podłoża pod fundamentem oraz jako efekt działania obu tych czynników równocześnie. W pierwszym przypadku nie ma powodu powstania poziomych sił stycznych, w drugim przypadku graniczne siły styczne odpowiadać będą wytrzymałości podłoża na przesuw po nim fundamentu, w trzecim natomiast - graniczne siły styczne mogą osiągać wartości w granicach:

$$0 < \theta < \vartheta$$

Wyniki badań przeprowadzonych w warunkach modelowania różnego wskaźnika deformacji podłoża pozwoliły wyznaczyć następującą funkcję granicznych naprężeń stycznych.

$$\theta = A\,\sigma\,\mathrm{tg}\,\varphi\,\frac{\frac{u}{\varepsilon b}}{B^{*} + \frac{u}{\varepsilon b}} \qquad (3)$$

gdzie:

$\frac{u}{\varepsilon b}$ - wskaźnik deformacji podłoża,

$A=0,9$, $B^{*}=3,6$ - stałe parametry wynikające ze statycznego opisu wyników doświadczeń.

Uzyskane wyniki badań wskazują na to, że w stanie granicznym naprężenia styczne pod ławami, usytuowanymi prostopadle do kierunku odkształceń podłoża są tym większe im większe wystąpią przemieszczenia podłoża przy określonych jego odkształceniach.

Przyjmując, że przemieszczenia gruntu pod budowlą są funkcją odkształceń i odległości rozpatrywanego przekroju od środka fundamentu, można wnioskować, że naprężenia styczne pod skrajnymi ławami budowli osiągają wartości największe, zaś w pobliżu środka budowli naprężenia takie będą niewielkie lub równe zeru. Potwierdzeniem takiego wniosku są wyniki badań na obiektach eksperymentalnych, z których wyraźnie wynika zależność wielkości sił stycznych od odległości ław od środka budowli. Uwzględniając wy-

niki doświadczeń na obiektach rzeczywistych otrzymano następujące wyrażenie na graniczne naprężenia styczne.

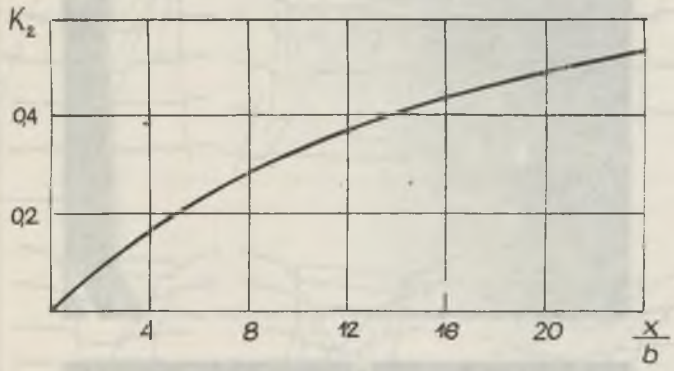
$$\vartheta = K_2 \vartheta'$$

gdzie:

$$K_2 = 0,9 \frac{\frac{x}{b}}{17 + \frac{x}{b}} \qquad (4)$$

x - odległość rozpatrywanej ławy od środka budowli.

Współczynnik K_2 określa redukcję granicznych naprężeń stycznych w stosunku do standardowej wytrzymałości gruntu na ścianie ϑ' w zależności od usytuowania rozpatrywanej ławy pod budowlą. Na rys. 12 przedstawiony został wykres zależności współczynnika K_2 od stosunku $\frac{x}{b}$.

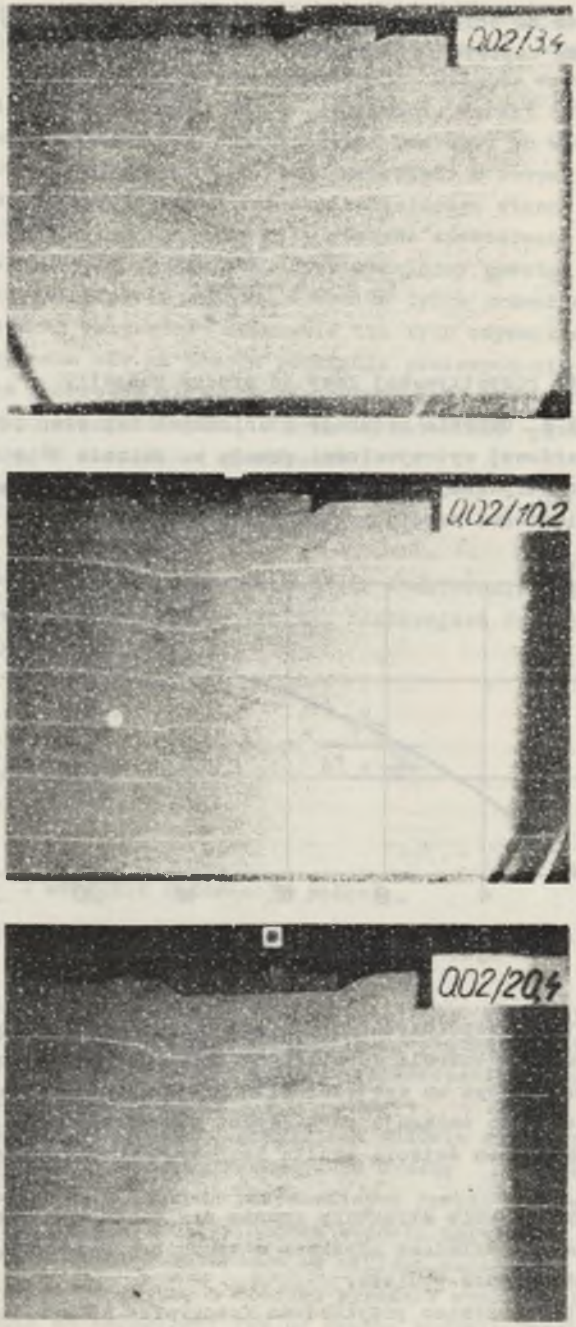


Rys. 12. Wykres współczynnika K_2

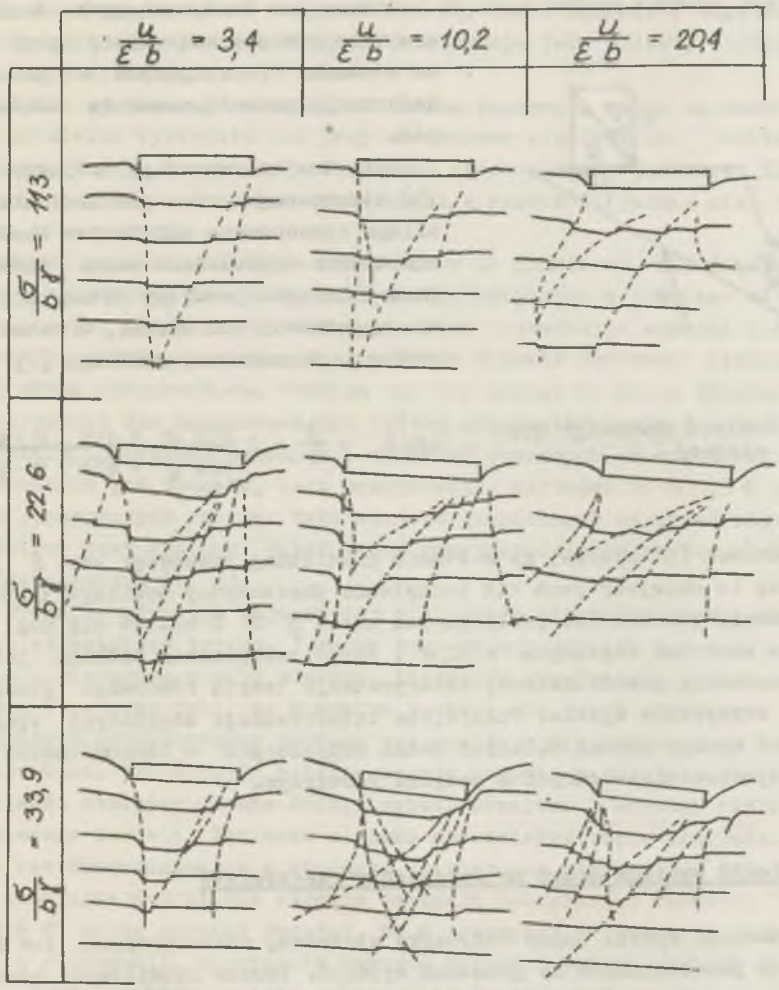
Analiza wartości współczynnika K_2 przy uwzględnieniu spotykanych w rzeczywistości wymiarów budowli i szerokości ław fundamentowych pozwala stwierdzić, że nie przekracza on wartości $K_2 = 0,5$ z czego wynika, że graniczne naprężenia styczne osiągają co najwyżej połowę wartości naprężeń określonych przy założeniu ścięcia gruntu bezpośrednio pod podstawą fundamentu.

O tym, że zniszczenie struktury gruntu nie następuje w płaszczyźnie podstawy fundamentu świadczą uzyskane w trakcie prowadzenia badań modelowych obrazy zniszczenia podłoża.

Na rys. 13 zamieszczono przykładowo fotografie obrazujące powierzchnie poślizgu powstałe w podłożu modeli ław poprzecznych.

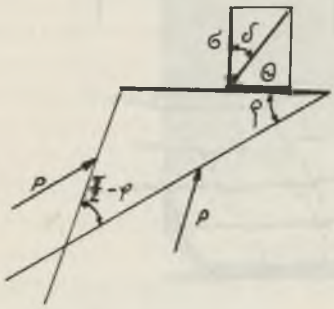


Rys. 13. Fotografie obrazujące kształt powierzchni poślizgu w podłożu ław poprzecznych



Rys. 14. Formy zniszczenia podłoża ław poprzecznych

Na rys. 14 zestawiono natomiast uzyskane z wszystkich badań formy zniszczenia podłoża, z których wynika, że ścięcie gruntu następuje po powierzchniach ukośnie nachylonych do podstawy ław fundamentowych. Nachylenie tych powierzchni zależy przy tym od stosunku występujących w procesie deformacji przemieszczeń do odkształceń.



Rys. 15. Trójkąt równowagi granicznej

Rozpatrując równowagę trójkąta (rys. 15) utworzonego przez powierzchnie poślizgu spowodowane działaniem ukośnego obciążenia wyprowadzić można następującą zależność pomiędzy kątem pochylenia wypadkowej obciążenia, a kątem nachylenia płaszczyzny poślizgu [3]

$$\operatorname{ctg}\delta = \frac{\sigma}{\theta} = 2\,\frac{\sin^2\varrho + \cos^2(\varphi-\varrho)}{\sin^2\varrho + \sin^2(\varphi-\varrho)}. \tag{5}$$

Z zależności (5) wynika, że w stanie granicznej równowagi kąt δ jest tym większy im mniejszy jest kąt pochylenia płaszczyzny poślizgu ϱ oraz, że wystąpienie powierzchni poślizgu pod kątem $\varrho > 0$ wiązać się musi z powstaniem naprężeń stycznych $\theta < \vartheta$. Formy zniszczenia podłoża jakościowo odpowiadają przedstawionej interpretacji teorią równowagi granicznej w jej statycznym ujęciu. Pełniejsza interpretacja uzyskanych wyników doświadczeń wymaga jednak dalszych badań dotyczących w szczególności kinematyki zjawisk zachodzących w podłożu górniczym.

6. Uogólnienie wyników badań na fundamenty rzeczywiste

Przedstawione wyniki badań dotyczyły wiotkich, odosobnionych ław fundamentowych posadowionych na gruntach sypkich. Podane rozwiązania odnoszą się ponadto jedynie do przypadków o wyraźnie określonym kierunku odkształceń podłoża w stosunku do długości ław fundamentowych. W rzeczywistości fundamenty ławowe tworzą najczęściej pod budowlami układy rusztów, konstrukcje fundamentów i budowli charakteryzują się pewną określoną sztywnością, a kierunek odkształceń podłoża budowli najogólniej rzecz biorąc może być ukośny w stosunku do długości poszczególnych ław rusztu.

Łącznie z rozpełzaniem podłoża występuje wypukła krzywizna terenu powodując ubytek reakcji podłoża pod brzegami budowli i ich zwiększenie w środkowych partiach fundamentu. Podobne zjawisko jest efektem odkształceń podłoża i wykazane zostało między innymi w pracach [8, 10]. Wpływ krzywizny podłoża oraz jego odkształceń na zmianę rozkładu nacisków pod budowla-

mi nie został od chwili obecnej w pełni zbadany. Do czasu rozwiązania tego problemu proponuje się, przy projektowaniu zabezpieczeń fundamentów na siły rozciągające, nie uwzględniać sztywności budowli i traktować fundamenty oraz spoczywające na nich konstrukcje jako obiekty wiotkie w płaszczyznach pionowych.

Takie upraszczające założenia można poczynić, mając na uwadze, że stany graniczne występują już przy stosunkowo niewielkich odkształceniach gruntu, którym towarzyszą nieznaczne pionowe ruchy podłoża. Założenie to prowadzić będzie do popełnienia błędu, z korzyścią jednak dla bezpieczeństwa konstrukcji.

Wyznaczone na podstawie badań wzory na graniczne naprężenia styczne nie uwzględniają wzajemnego wpływu sąsiadujących z sobą ław w ruszcie fundamentowym. Można przypuszczać, że przy odpowiednio szerokich ławach i niewielkich odstępach między nimi podłoże budowli pracować będzie podobnie jak płyta fundamentowa. Problem ten nie został na razie zbadany i dlatego z korzyścią dla bezpieczeństwa byłoby nieuwzględnianie do chwili jego rozwiązania uzyskanych zależności naprężeń stycznych od usytuowania ław poprzecznych pod budowlę, lecz przyjmowanie wartości $\theta = 0,5\,\vartheta$ pod każdą z ław poprzecznych rusztu. Taka wartość granicznych naprężeń stycznych uzasadniona jest wynikami doświadczeń przeprowadzonych na wiotkich płytach fundamentowych [4, 6].

Prognozy górnicze najczęściej nie podają kierunków występowania poziomych odkształceń terenu. Powodem tego są najczęściej nie zawsze sprecyzowane zamierzenia kopalń odnośnie kierunków eksploatacji, usytuowania krawędzi itp. oraz fakt, że w wyniku prowadzenia robót górniczych w kilku pokładach odkształcenia podłoża rzeczywiście występować mogą w różnych kierunkach. Projektując zabezpieczenie budowli uwzględnia się taką ewentualność stosując ukośne ściągi zabezpieczające pierwotny kształt rzutu poziomego budowli. Ponieważ zbadane charakterystyczne przypadki usytuowania ław fundamentowych w stosunku do kierunku odkształceń świadczą o tym, że graniczne naprężenia styczne osiągają maksymalnie wartości $\theta = 0,5\,\vartheta + 0,6\,\vartheta$ można również przyjąć, że w przypadku ukośnego kierunku występowania deformacji, naprężenia styczne wartości takiej również nie przekracza. Ławy przekątne rusztu należy więc projektować przyjmując, że pod wszystkimi ławami przekazującymi obciążenie z budowli na podłoże występują naprężenia $\theta = 0,6\,\vartheta$.

LITERATURA

[1] BUDZYŃSKI H.: Wpływ rozpełzania podłoża górniczego na wiotkie ławy fundamentowe usytuowane równolegle do kierunku rozpełzania. Praca doktorska GIG Katowice 1974.

[2] EWIOKIMOW P.P.: Procznost osnowanij i ustojczivost gidrotiechniczeskich soorużonij na mjakich gruntach Gosenergozdat. Moskwa-Leningrad 1956.

[3] GLINKO H.: Rozpełzanie gruntu w świetle jego reologicznych własności. Praca doktorska GIG Katowice 1973.

[4] KWIATEK J.: Wpływ rozpełzania podłoża na siły rozciągające w fundamentach budowli. Praca doktorska GIG Katowice 1965.

[5] KWIATEK J., ZAWORA J., KOWALCZYK A.: Graniczne siły rozciągające fundamenty budowli na rozpełzającym podłożu sypkim. Przegląd Górniczy, Biuletyn GIG. Rok 19, nr 1, K-ce 1966 r.

[6] KWIATEK J., GLINKO H., ZAWORA J.: Stany graniczne w gruncie na terenach objętych wpływami podziemnej eksploatacji górniczej. Prace GIG, Komunikat nr 542, Wyd. Śląsk, Katowice 1971.

[7] KWIATEK J., GLINKO H., KOWALCZYK A., ROGUSZ Z., ZAWORA J., ŻYCICKI B.: Badania terenowe wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na budowle eksperymentalne. Prace GIG, Komunikat nr 620, Wyd. Śląsk Katowice 1974.

[8] MALCHEREK K.: Działanie ruchomego podłoża sypkiego na wiotką taśmę równomiernie obciążoną. Praca doktorska Pol. Śl. Gliwice 1971.

[9] ROSIKOŃ A.: Wpływ poziomych odkształceń podłoża na rozkład naprężeń normalnych i stycznych w podstawie sztywnej ławy fundamentowej leżącej na podłożu sypkim. Praca doktorska. Pol. Śl. Gliwice 1964.

[10] ZAWORA J.: Badania modelowe wpływu poziomych odkształceń podłoża na fundamenty budowli. Praca 616, Komunikat nr 569. Wyd. Śląsk Katowice 1972.

[11] ZAWORA J.: Wpływ poziomych odkształceń podłoża górniczego na ławy fundamentowe usytuowane poprzecznie do kierunku tych odkształceń. Praca doktorska GIG Katowice 1974.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОСНОВАНИЯ, ВЫЗВАННОЙ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ НА ФУНДАМЕНТ ПОСТРОЙКИ

Р е з ю м е

В работе дано характеристику проведённого исследования влияния, выступающей, ввиду, подземной разработки, продольной деформации основания на фундамент постройки.

Проведено исследования на моделях и полевые изыскания на специальных экспериментальных объектах.

Целью исследований было определить величину сил в тонких фундаментах, расположенных параллельно и перпендикулярно по направлению деформации сыпучего грунта, а вызывающих его ослабление.

Показано результаты исследований и их интерпретацию на основе, которой сформулировано формулы, позволяющие определить горизонтальные силы в фундаментах постройки основанных на территории отведённой под горные работы. Силы эти значительно меньше, чем те для которых проектируется сейчас защита постройки от повреждения в результате горных работ.

THE INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF HORIZONTAL SUBSOIL DEFORMATIONS CAUSED BY UNDERGROUND MINING ON BUILDING FOUNDATIONS

S u m m a r y

In the work there have been presented the investigations of the influence of the horizontal subsoil deformations caused by underground mining on continuous foundations.

Model investigations as well as site investigations have been carried out on experimental objects erected aspecially for that purpose. The aim of these investigations was to define the value of forces in continuous foundations situated in a parallel a perpendicular way to the direction of non- cohesive soil deformations which cause its loosening. There have also been presented the results of investigations and their interpretation on the basis of which there have been formulated equations that enable us to estimate the horizontal forces in the foundations of buildings situated in the mining areas. These forces are considerably smaller than those for which building safety devices against mining damages are being designed at present.